

IDENTIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE MESOCICLONES Y ESTRUCTURAS SIGNIFICATIVAS DE VIENTO A PARTIR DE DATOS DE RADAR DOPPLER

NOTA TÉCNICA S.T.A.P. N° 43

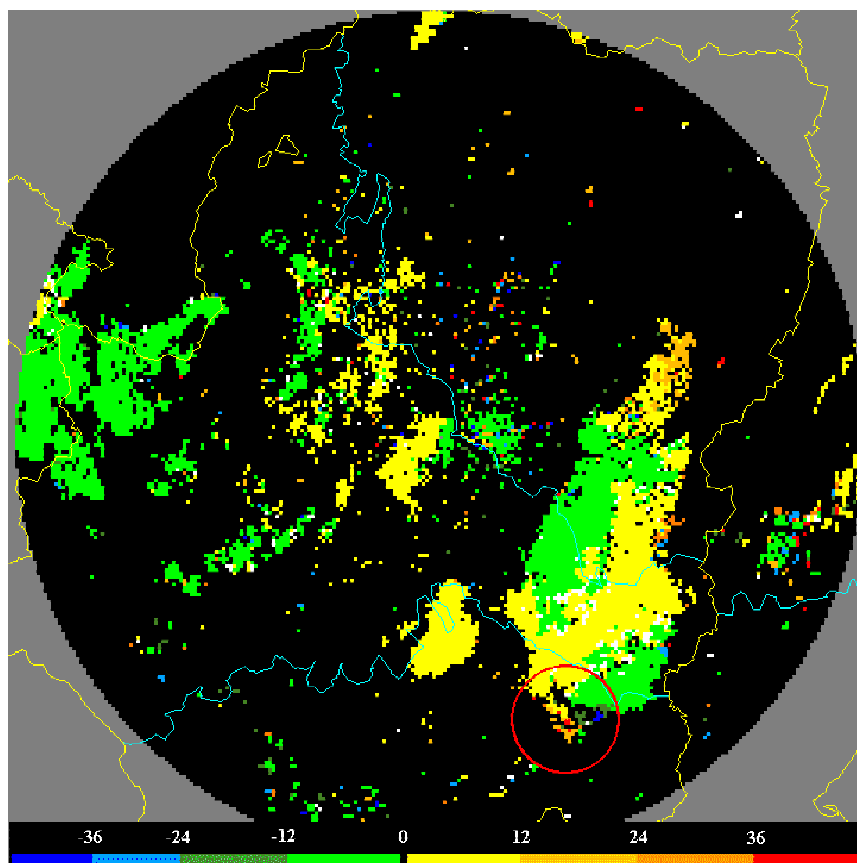


Imagen de viento radial del radar de Zaragoza correspondiente al día 23 de julio de 2003 a las 15:04UTC. Aparece señalada con un círculo rojo la posición de la estructura significativa de viento identificada de forma automática. La estructura estaría asociada con el mesociclón de la supercélula que afectó a la localidad de Alcañiz, donde se registró un tornado a las 15:00 UTC

Sara Conejo Jorge*
Fermín Elizaga Rodríguez

Servicio de Técnicas de Análisis y Predicción (S.T.A.P.)
Área de Predicción y Aplicaciones
Subdirección General de Predicción

* Beca de formación de postgraduados 2003-2004

ÍNDICE

RESUMEN	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. ANTECEDENTES	4
3. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO UTILIZADO POR EL NSSL MDA	7
4. PROCEDIMIENTO DESARROLLADO EN EL STAP	11
5. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO A ESTRUCTURAS SIMULADAS .	19
6. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO A SITUACIONES REALES.....	22
7. CONCLUSIONES	28
BIBLIOGRAFÍA.....	30

RESUMEN

Esta Nota Técnica tiene como objetivo principal documentar el desarrollo de un método de análisis automático de imágenes de viento radial Doppler. En una primera fase el trabajo se ha centrado en la identificación automática de mesovórtices y circulaciones de viento radial significativas a escala convectiva (entre 1 y 10 Km. de diámetro) en niveles bajos. Una vez desarrollado este método se ha ajustado utilizando algunas situaciones recogidas a lo largo del año 2003.

Este proyecto está enmarcado dentro de las becas de Formación de Postgraduados convocadas en el BOE de 4 de febrero de 2003, concretamente en la beca: *“Aplicación a la vigilancia y predicción inmediata de las imágenes de radares meteorológicos Doppler y de los perfiles de viento derivados”*. El desarrollo se ha llevado a cabo en el Servicio de Técnicas de Análisis y Predicción (STAP), del Área de Predicción y Aplicaciones (APA) del Instituto Nacional de Meteorología.

1. INTRODUCCIÓN

El radar es una herramienta esencial e imprescindible en la vigilancia y predicción inmediata de fenómenos convectivos, en particular de tormentas severas, esto es, tormentas que producen tornados, granizo de diámetro igual o superior a 2 cm o vientos de intensidad superior a 50 Kt (ver Nota Técnica del STAP N° 35: *Diagnóstico y predicción de convección profunda*, Martín F. et al., 2001). Su uso se extiende a la identificación de propiedades relacionadas con el campo de viento, patrones comunes a tornados o precipitación significativa, fenómenos que pueden en un momento dado ser adversos tanto para la seguridad como para las propiedades de las personas. El predictor puede interpretar directamente en las imágenes radar ciertas características que le permitan evaluar o estimar la severidad de una tormenta, pero la automatización de ciertos procesos puede facilitar este trabajo. El radar Doppler obtiene la reflectividad de los ecos y la velocidad radial del viento, pudiendo ser éstos a su vez utilizados como datos de entrada para ciertos algoritmos automáticos que proporcionan información adicional sobre la estructura e intensidad de la tormenta. Estos algoritmos ayudan al predictor a determinar la posible severidad de una estructura tormentosa y en el proceso de toma de decisiones frente a distintas situaciones adversas.

Durante el periodo comprendido entre mayo de 2003 y abril de 2004 se ha desarrollado un procedimiento que permite detectar automáticamente estructuras significativas de viento, que pueden estar asociadas con la presencia de mesociclones, tomando como referencia las imágenes de viento radial Doppler. Posteriormente el método se ha ajustado utilizando distintas situaciones recogidas a lo largo del año.

La primera fase del trabajo se ha basado en la búsqueda y recogida de información sobre los algoritmos de detección de este tipo de estructuras significativas en las imágenes de viento radial Doppler. El estudio bibliográfico conduce a distintos algoritmos desarrollados en Estados Unidos, donde, desde la década de los ochenta, se ha estado trabajando en la detección de mesociclones a partir de las imágenes de reflectividad y de viento radial. Actualmente está operativo el Mesocyclone Detection Algorith, MDA, (Stumpf et. al, 1997) desarrollado por el National Severe Storms Laboratory (NSSL) para el Weather Surveillance Radar-1988 (WSR-88D). Este algoritmo está en continuo desarrollo y es objeto de múltiples estudios para conseguir una mejora de la capacidad de localización de mesociclones y una reducción, a su vez, del número de falsas alarmas.

Siguiendo la estructura básica de este algoritmo (NSSL MDA) y teniendo en cuenta las limitaciones que actualmente se poseen, principalmente al no disponer de datos en McIDAS de viento radial más que en la primera elevación del radar, se ha desarrollado un algoritmo que localiza de forma automática estructuras significativas en dicha imagen. Este procedimiento se explica de forma detallada en el apartado 4.

Los resultados de la aplicación del algoritmo a distintas estructuras teóricas se presentan en el apartado 5. En el apartado 6 se muestran algunos ejemplos de distintas situaciones ocurridas a lo largo del año 2003, para las que existe conocimiento de la existencia de supercélulas o de algún fenómeno significativo de viento.

2. ANTECEDENTES

Los estudios más relevantes en la detección de estructuras de viento de origen convectivo en las imágenes de viento radial Doppler se han realizado en Norteamérica, donde se han desarrollado distintos algoritmos desde la década de los ochenta.

Actualmente se mantiene en operación, aunque con constantes actualizaciones, un algoritmo de detección de mesociclones, Mesocyclone Detection Algorithm (MDA), para los radares WSR-88D, desarrollado por el NSSL. Este algoritmo detecta y permite diagnosticar señales significativas en la velocidad radial a escala de la tormenta (entre 1 y 10 Km. de diámetro). El NSSL MDA es una mejora del WSR-88D Build Mesocyclone Algorithm (88D B9MA), desarrollado durante la década de los ochenta y basado en un algoritmo descrito por Zrníc et al. (1985), el cual era utilizado para detectar en la velocidad radial Doppler señales de rotación significativa en tormentas severas y que fue usado por el National Weather Service (NWS) en sus avisos desde que se dispuso del primer radar WSR-88D.

En los años ochenta se definieron algunos criterios de intensidad que permitieran identificar mesociclones, basados en las observaciones de los radares Doppler. Estos criterios, junto con algunos modelos conceptuales de vórtices atmosféricos, permitieron el desarrollo de algoritmos que detectaban automáticamente estos fenómenos. Sin embargo, desde los primeros trabajos se produjeron importantes debates sobre la definición de un mesociclón en términos radar. Tradicionalmente, un mesociclón se define como una región de rotación a escala de la tormenta, típicamente alrededor de 3 y 10 Km de diámetro y habitualmente localizada en el flanco posterior derecho de una supercélula. En términos radar un mesociclón se define como una señal de rotación en una imagen de radar Doppler que cumple unos criterios específicos de magnitud, profundidad vertical y duración. Por consiguiente, y de forma estricta, un mesociclón no tiene por que ser un fenómeno visualmente observable (Glosario meteorológico de términos radar para tormentas, National Weather Service Forecast Office, www.srh.noaa.gov/oun/severewx/glossary.php#Introduction).

Los primeros estudios sobre mesociclones y los algoritmos desarrollados contaron con escasos datos de radar para poder ser analizados. En la era “pre-WSR-88D” existían muy pocos archivos de datos de radares Doppler y la mayoría de ellos pertenecían a mesociclones que tuvieron lugar en Oklahoma. En consecuencia, los primeros trabajos no dispusieron de una base de datos de radares suficientemente extensa ni temporal ni espacialmente, ya que estaba reducida a un área muy restringida y el periodo de tiempo no era lo suficientemente largo. Por ejemplo, Zrníc et al. (1985) y Desrochers & Donaldson (1992) utilizaron datos de ciertas horas y tormentas, pero solamente en la región central de Oklahoma. A pesar de estas limitaciones estos primeros algoritmos fueron un éxito a la hora de detectar estructuras significativas dentro de una imagen de viento radial Doppler. El uso operativo del 88D B9MA permitió descubrir una serie de defectos en sus algoritmos, principalmente un alto número de falsas alarmas en determinadas situaciones tormentosas, como por ejemplo en líneas de turbonada.

A mediados de los noventa se desarrolló en el NSSL un nuevo algoritmo para la detección de mesociclones, dirigido a minimizar los errores comentados, y para que sirviera de ayuda a los predictores a la hora de tomar las decisiones más adecuadas frente a una situación potencialmente adversa. La primera versión tuvo como objetivo

resolver el problema del alto número de falsas alarmas, incrementando los umbrales existentes y creando algunos nuevos, basados en criterios de intensidad, espaciales y de continuidad temporal. El nuevo diseño tuvo en cuenta también la dificultad del 88D B9MA para detectar mesociclones en puntos alejados de la posición del radar, y por tanto más elevados. El resultado fue un nuevo algoritmo de detección de mesociclones, más tarde llamado Early MDA (Stumpf and Witt, 1994), que mejoró el algoritmo anterior consiguiendo un índice de aciertos más alto. Sin embargo, la capacidad de detección del Early MDA era todavía limitada y un alto número de mesociclones asociados con tiempo severo y tornados no eran detectados. El desarrollo del Early MDA coincidió con la primera fase de desarrollo de la red WSR-88D y en ese momento no se disponía todavía de una base de datos suficiente. La distribución geográfica se limitaba todavía a ciertas áreas y la base de datos de viento no llegaba a cubrir un periodo de tiempo considerable. Como consecuencia de ello, la mayor parte de los datos usados en el desarrollo del 88D B9MA y del Early MDA corresponden a otros radares con características diferentes.

Posteriormente con la implantación de la red del WSR-88D y su instalación a lo largo de todo el territorio de Estados Unidos, la cantidad de datos de radar se incrementó de forma significativa. Los datos ya no quedaron restringidos a unas áreas geográficas limitadas y se dispuso de datos a lo largo de periodos temporales más largos. Debido a los citados problemas del Early MDA, el NSSL desarrolló el llamado NSSL MDA. En el desarrollo de este algoritmo se utilizaron exclusivamente datos del WSR-88D. La definición de mesociclón usada en el 88D B9MA y en el Early MDA se basa en unos umbrales de intensidad específicos, sin embargo, la intensidad de un mesociclón no siempre es un indicador de su severidad. Algunos tornados o eventos de tiempo severo que tienen lugar en tormentas y que están asociados con vórtices no alcanzan ninguno de estos umbrales. Por otro lado también pueden existir vórtices intensos sin que se produzca un tornado o tiempo severo. Como consecuencia de ello el nuevo algoritmo de detección de mesociclones debería ser capaz de detectar un espectro amplio de vórtices a escala de la tormenta (del orden de 1 a 10 Km de diámetro) y más tarde clasificar cada detección con una serie de reglas robustas. Adicionalmente, una vez clasificado un vórtice y sus características se podría tratar de determinar la probabilidad de que el vórtice estuviera asociado con un tornado o con la ocurrencia de tiempo severo. En resumen, el NSSL MDA se construyó sobre los trabajos previos del Early MDA y el desarrollado por Desrochers & Donaldson (1992). En lugar de definir unos umbrales de intensidad desde los primeros análisis, como hace el 88D B9MA y el Early MDA, el NSSL MDA detecta todos los vórtices a escala de tormenta (1-10 Km de diámetro) y es entonces cuando se determina si son o no son significativos.

En el INM se han realizado distintos trabajos para la automatización de ciertos procesos que faciliten el trabajo del predictor a la hora de interpretar las imágenes radar. Actualmente se dispone de una aplicación operativa, YRADAR (Martín F. et al., 2002) para la obtención de un análisis objetivo automático de imágenes radar de reflectividad en modo normal, que permite extraer información de estructuras (2D) y células (3D) convectivas, combinando la información extraída con datos de rayos y de satélite. En relación con los datos Doppler y en modo experimental se ha desarrollado una aplicación similar, el YRADARD, que permite una mayor resolución (1x1 Km. en lugar de 2x2 Km. en modo normal) y analiza bidimensionalmente estructuras convectivas a partir del PPI o CAPPI bajo en dos dimensiones. También se dispone de otro producto derivado de los datos en modo Doppler como son los datos VAD (Conejo S. y Elizaga

F., 2003y 2004). Sin embargo hasta el momento actual no existía ningún procedimiento operativo que llevara a cabo un análisis objetivo automático de los datos de viento radial Doppler. Los primeros pasos en este sentido corresponden al procedimiento descrito en esta Nota Técnica para la identificación automática de mesociclones y estructuras significativas de viento a partir de datos de radar Doppler.

Aunque los radares Doppler que posee el INM toman los datos de velocidad radial en volumen polar, la información a la que se ha podido acceder está sólo disponible en coordenadas cartesianas, con píxeles de igual tamaño de resolución 1x1 Km. Por ello y como consecuencia de que en McIDAS sólo es posible acceder en la actualidad a los datos de la exploración más baja, PPI a 0.5° de elevación, no se ha podido desarrollar un procedimiento totalmente equivalente al NSSL MDA.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO UTILIZADO POR EL NSSL MDA

Básicamente el objetivo de todos los algoritmos de detección de mesociclones es la detección automática de un área de rotación en los datos de velocidad radial Doppler. Como sólo se mide la componente radial de la velocidad, es decir ecos alejándose y acercándose a la posición del radar, las áreas de rotación aparecen como dos máximos de viento radial de direcciones opuestas, de forma que el segmento que los une es perpendicular a la radial desde el radar.

El NSSL MDA analiza el viento radial Doppler en cuatro dimensiones. El algoritmo comienza procesando los datos en una dimensión (1D), donde se detectan los segmentos para los que existe cizalladura ciclónica. Seguidamente cada segmento de cizalladura es asociado horizontalmente con otros segmentos que se encuentran a diferentes distancias del radar y a elevación constante, dando lugar a estructuras en dos dimensiones (2D). Este proceso se repite para cada elevación del radar. El MDA usa la asociación vertical para crear estructuras en tres dimensiones al final de cada volumen de exploración. Finalmente, la asociación temporal se emplea para completar el proceso y poder clasificar el vórtice de mesoescala.

Como primer paso, el MDA (Stumpf et. al. 1997) elimina de los datos de viento radial aquellas velocidades que se corresponden con valores de reflectividad por debajo de un umbral establecido. Originalmente el algoritmo utilizaba un umbral de reflectividad de 20 dBZ, de forma que cualquier velocidad radial asociada con reflectividades menores que este valor no era tomada en cuenta. Posteriormente se ha comprobado que el uso de este umbral puede provocar la eliminación de algunos datos válidos, lo que causa errores de detección. Los archivos históricos mostraron que existen gran número de mesociclones en los límites de las tormentas o en áreas de baja precipitación que no eran localizados por el MDA al no llevar asociados una reflectividad superior a 20 dBZ. Para solucionar el problema dicho umbral ha experimentado distintas modificaciones y finalmente se ha considerado bajarlo a 0 dBZ. Aunque este hecho mejoró la detección en los bordes de las tormentas, ha provocado un aumento de falsas alarmas en zonas sin precipitación, especialmente en condiciones de aire claro en las proximidades del radar. Como consecuencia, actualmente se diferencian las áreas de precipitación y no-precipitación y se usa esa información para validar umbrales y así mejorar la detección de verdaderos mesociclones (Mazur et al. 2003).

A continuación se analiza en detalle el algoritmo seguido por el NSSL MDA principalmente para la detección en una y dos dimensiones, que son aquellas en las que se basará el algoritmo desarrollado en el STAP.

a) Análisis en una dimensión (1D)

La detección automática de vórtices comienza con la búsqueda de señales de cizalladura ciclónica azimutal en los datos de velocidad radial Doppler. Teniendo en cuenta que el WSR-88D recoge datos para las distintas elevaciones en el sentido de las agujas del reloj, la cizalladura ciclónica se caracteriza (en el hemisferio norte) por un incremento de la velocidad radial según se incrementa el azimut. El procedimiento empieza comparando dos píxeles adyacentes a una distancia fija del radar (mismo rango). Si existe cizalladura ciclónica, se crea un segmento de cizalladura incompleto. El

procedimiento continúa para el siguiente píxel adyacente según avanzamos en azimut a un rango fijo. Mientras que el 88D B9MDA se caracterizaba por seleccionar segmentos de cizalladura continuamente positivos, el NSSL MDA acepta algunas perturbaciones de pequeña escala, es decir, acepta que no exista continuamente cizalladura azimutal positiva, que algunos píxeles muestren velocidades inferiores que el anterior.

Para cada segmento 1D se calcula la diferencia de velocidad, que es la diferencia entre los dos valores máximos de velocidad pero de distinto sentido, es decir entre el máximo negativo que corresponde con ecos que se aproximan al radar y el máximo positivo que corresponde con ecos que se alejan (la distancia entre los píxeles correspondientes es la longitud del segmento de cizalladura). La cizalladura (S) es la diferencia de velocidad dividida entre la longitud del segmento. La máxima diferencia de velocidad “gate to gate” (“gate to gate” define píxeles de muestra adyacentes a una distancia fija del radar) es la diferencia mayor de velocidad entre dos valores de velocidad contiguos dentro de un segmento de cizalladura, GTGVD. Este algoritmo utiliza una serie de umbrales para eliminar ciertos segmentos de cizalladura, concretamente un umbral de velocidad y de cizalladura dependiendo de la distancia del segmento a la posición del radar. Esto es necesario debido al hecho de que a distancias alejadas del radar un vórtice intenso y de dimensiones pequeñas podría ser confundido con uno débil y de mayor tamaño.

En el Early MDA los umbrales dependían de la distancia al radar y fueron obtenidos experimentalmente haciendo uso de los valores mínimos observados en distintos mesociclones. Estos valores procedían del análisis de datos de mesociclones que tuvieron lugar en Oklahoma entre los años setenta y ochenta. El umbral Δv se usa tanto para la diferencia de velocidad como para el máximo GTGVD. Un segmento de cizalladura se conservaba si el máximo GTGVD era superior a un umbral Δv para una distancia fija del radar o si la diferencia de velocidad y la cizalladura eran superiores a un cierto valor umbral dependiente de la distancia al radar. El NSSL MDA utiliza un nuevo método que asigna un *rango de intensidad* (Tabla 1), número adimensional del 1 al 25 al cual corresponden un umbral para el valor de la cizalladura y otro para la diferencia de velocidad. Los valores del *rango de intensidad* 1 y 5 corresponden con los valores usados ya anteriormente en el Early MDA y el resto son interpolaciones o extrapolaciones de estos valores.

Strength rank	Velocity difference	
	(Δv) (m s ⁻¹)	Shear (m s ⁻¹ km ⁻¹)
1*	10.0	3.00
2	15.0	3.75
3	20.0	4.50
4	25.0	5.25
5**	30.0	6.00
6	35.0	6.75
7	40.0	7.50
8	45.0	8.25
9	50.0	9.00

* Phillips Laboratory criteria (DD92).

** Early-MDA criteria.

Tabla 1. Rango de intensidad del NSSL MDA del 1 al 9.

b) Análisis de una exploración completa a elevación constante (2D)

El NSSL MDA encuentra un gran número de segmentos 1D, por lo que es necesario una técnica suficientemente robusta para la extracción de vórtices en dos dimensiones, 2D, con el objeto de disminuir el gran número de falsas alarmas que podrían aparecer. Básicamente este procedimiento consiste en asociar segmentos atendiendo a su proximidad espacial (Figura 1), es decir, segmentos que se solapen en azimut a distintos rangos, siempre que no estén separados más de 1 Km. en la radial. Si el número total de segmentos en una estructura 2D es menor que cuatro se desecha. Finalmente si la distancia al radar dividida por la distancia en azimut es mayor que dos también se elimina.

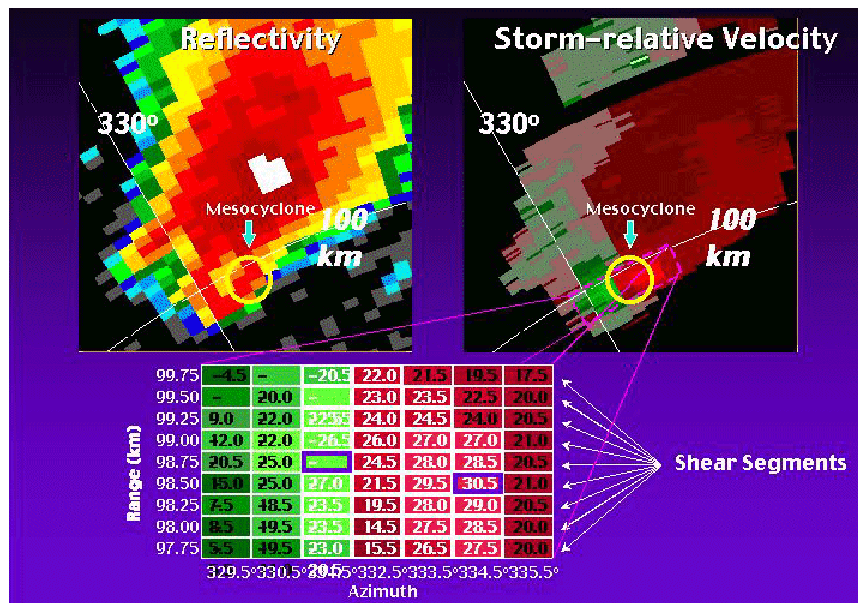


Figura 1. Ejemplo de una señal de un vórtice 2D en una imagen de viento radial (7 de Mayo de 1995, 21:07 UTC, elevación de 1.5°, Foth Worth, Texas). Los datos recuadrados corresponden con los máximos en ambos sentidos, aproximándose al radar y alejándose de él.

c) Análisis de un volumen completo (3D).

Una vez que se ha realizado la exploración total del volumen se lleva a cabo una asociación vertical de las estructuras 2D seleccionadas anteriormente, que consiste en una agrupación de dos o más estructuras a ángulos de elevación adyacentes. Se obtiene de esta forma una estructura 3D.

d) Asociación temporal y seguimiento

Cuando se identifican una o más estructuras 3D en dos volúmenes explorados consecutivos (es decir, separados menos 15 minutos) se estudia su evolución temporal. El primer paso en este procedimiento consiste en generar un “first-guess” para la esperada localización del centroide de la estructura detectada con el algoritmo 3D, usando el vector anterior del movimiento de la estructura 3D de la detección del MDA o, en caso de que no exista, el vector de movimiento (si la estructura se detecta por primera vez en el volumen anterior). Por defecto, el vector de movimiento es la media de todos los vectores de movimiento de las detecciones del MDA en el volumen previo

explorado o un valor definido por un operador en el caso de que no existan detecciones del MDA en el volumen anteriormente explorado. El valor definido por este operador se obtiene típicamente a partir del vector esperado de movimiento del mesociclón (movimiento medio de la tormenta de 0 a 6 Km. girado hacia la derecha). A partir de la posición del “first-guess” de cada estructura anterior se crean una serie de candidatos a detecciones 3D para el volumen explorado actual. El mejor candidato para cada posición es elegido de forma similar a la asociación vertical de estructuras 3D. El último paso es calcular un nuevo vector de movimiento para cada asociación en el tiempo de estructuras 3D. Este es simplemente una media del vector de movimiento anterior y el movimiento determinado a partir de la localización del centro de la estructura actual y anterior.

A cada estructura 3D se la asigna posteriormente un grado de intensidad 3D (3D strength rank) y se calcula un índice de intensidad del vórtice integrado verticalmente, llamado Mesocyclone Strength Index (MSI). Finalmente se emplea una red neuronal para diagnosticar la probabilidad de tornados o de vientos severos con cada vórtice. El uso de una red neuronal en el NSSL MDA representa un importante salto en el nivel de análisis para el algoritmo de tormentas severas y es la primera incursión en cuanto al uso de una red neuronal en cualquier algoritmo del WSR-88D. El siguiente paso en el análisis de los vórtices es una clasificación de las estructuras 3D basada en distintas reglas que definen la intensidad y las características espaciales y temporales de cada detección.

4. PROCEDIMIENTO DESARROLLADO EN EL STAP

A los datos de viento radial Doppler que van a ser utilizados se accede a través de McIDAS, disponiendo en la actualidad, como ya se ha comentado, de información para la primera elevación en coordenadas cartesianas con resolución 1x1 Km. Al no disponer de otras elevaciones del radar no es posible realizar la asignación vertical.

El prototipo desarrollado para la detección de mesociclones o estructuras significativas en la imagen de viento radial ha tomado como referencia un proceso similar al 1D y 2D del NSSL MDA, teniendo en cuenta, no obstante, el distinto formato de imagen con la que se cuenta. En esta primera aproximación no se ha incluido un procedimiento que tuviera en cuenta la evolución temporal y un seguimiento de las estructuras localizadas, siendo una asignatura pendiente para futuros desarrollos del algoritmo.

Para presentar con mayor claridad los diferentes pasos del algoritmo se ha tomado como ejemplo una imagen de viento radial Doppler del radar de Zaragoza de las 14:54 UTC del 27/07/03. La situación se corresponde con el desarrollo de una supercélula y de un tornado que afectó a Alcañiz (Teruel), aproximadamente a esa misma hora. Se indican a continuación los procesos llevados a cabo.

a) Tratamiento previo de los datos

Las imágenes de viento radial Doppler presentan, normalmente, un alto número de ecos asociados con uno o varios píxeles aislados, además de píxeles sin datos que originan un ruido excesivo entre valores de velocidad radial contiguos, como se ve en la Figura 2. Para tratar de eliminar este ruido de la imagen de viento radial se ha procedido a realizar un filtrado de la misma. Para ello se han eliminado aquellos píxeles que se encontraban aislados y aquellos otros que no estaban rodeados por más de dos píxeles contiguos con datos, de forma similar a como se puede apreciar en la Figura 3.

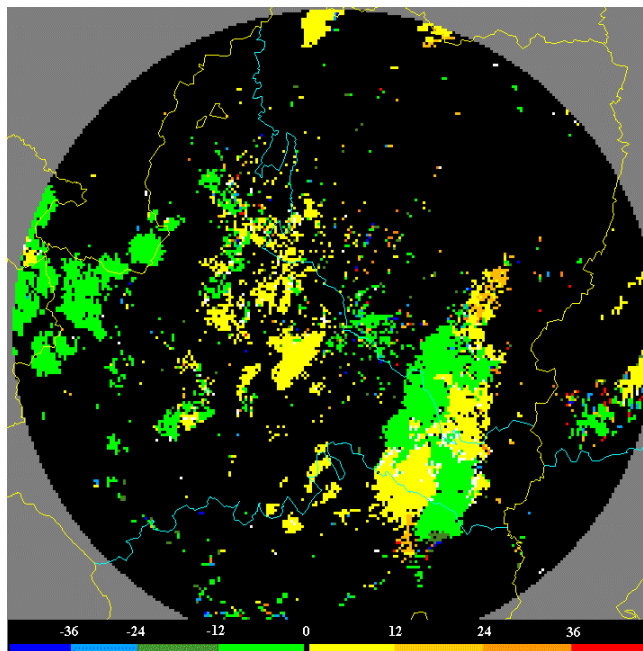


Figura 2. Imagen original de viento radial del radar de Zaragoza de 14:54 UTC del 23/07/03

El resultado de la aplicación de este filtro a la imagen original del radar de Zaragoza se muestra en la Figura 4. Una vez eliminados estos píxeles se ha llevado a cabo un tratamiento adicional de la imagen para intentar suavizarla, completando los huecos existentes. A los píxeles sin datos se les ha asignado el valor medio de los datos de viento que rodean al hueco, siempre que el número de estos sea mayor que cuatro. Con la aplicación de estos filtros la imagen, como puede comprobarse en la Figura 5, aparece mucho más apta para un posterior análisis automático de la misma, sin perder apenas la información relevante existente en la imagen original.

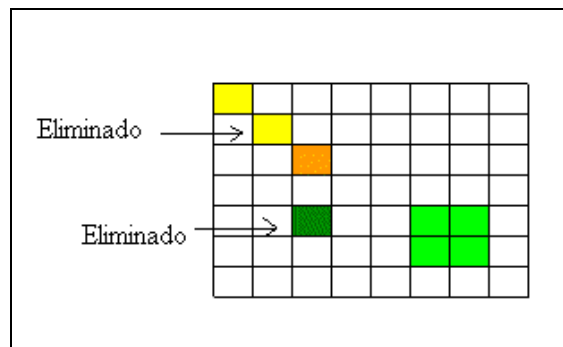


Figura 3. Ejemplo de algunos de los píxeles que se eliminarían en el tratamiento previo de los datos de una imagen de viento radial.

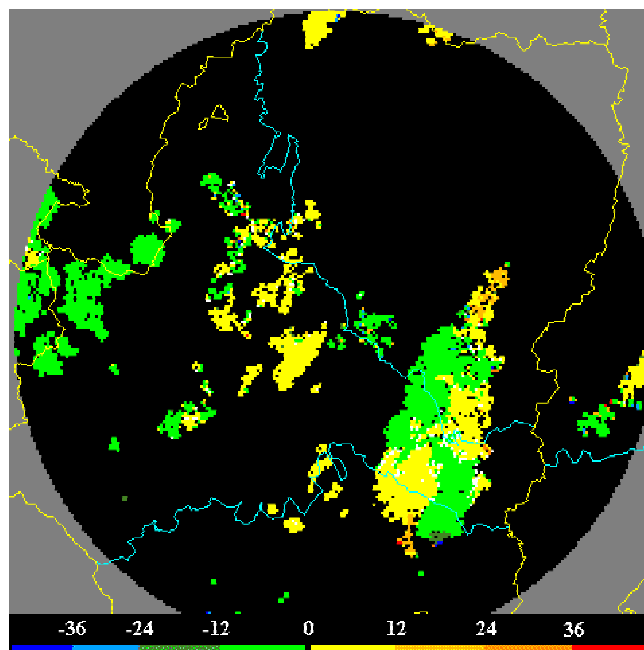


Figura 4. Imagen obtenida por filtrado de la imagen original de la Figura 2, eliminando píxeles aislados y aquellos que no están rodeados por más de 2 píxeles con datos.

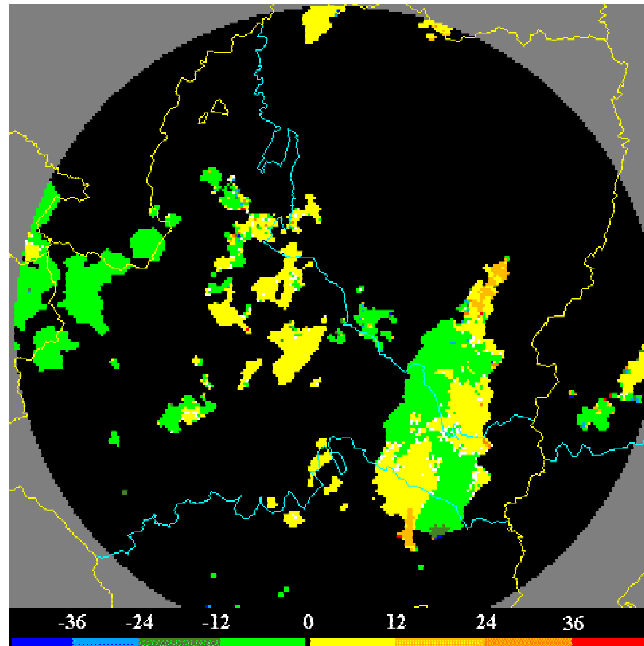


Figura 5. Imagen final resultado del tratamiento previo de los datos, en la que se han rellenados los píxeles sin dato con el valor medio de los datos de los vientos que están a su alrededor.

b) Análisis unidimensional (1D) por líneas o filas.

Una vez que se dispone de la imagen filtrada y suavizada se procede a la búsqueda de segmentos en cada una de las filas de la imagen, analizándolas en dirección oeste-este. Los segmentos positivos, es decir aquellos que sólo contienen velocidades positivas (corresponden con vientos que se alejan de la posición del radar), comienzan con un aumento creciente de la velocidad hasta alcanzar un máximo. A partir de este punto los valores de la velocidad decrecen hasta que se vuelve a producir otro aumento de la velocidad, momento en el que se corta el segmento. Si no existiera este descenso de la velocidad, por encontrarnos en los límites de la imagen o porque el siguiente píxel no tuviera dato, el segmento se terminaría al final de la parte creciente, en el máximo.

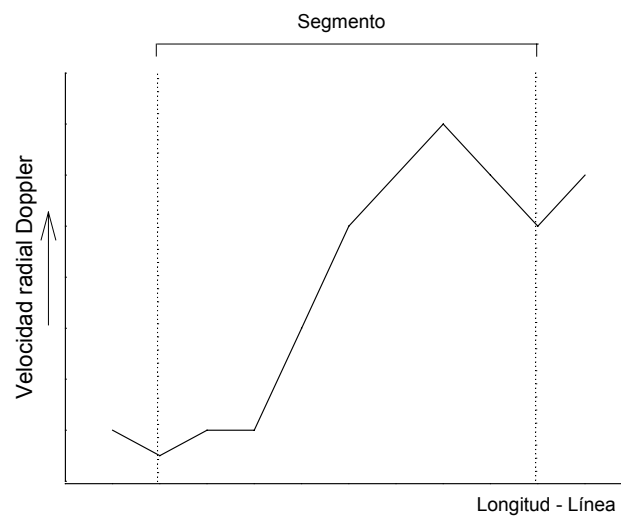


Figura 6. Píxeles que formarían un segmento positivo en una dimensión

Los segmentos negativos (corresponden con vientos que se aproximan a la posición del radar), aquellos que contienen sólo velocidades negativas, deben cumplir unas condiciones similares a los positivos, pero con velocidades decrecientes hasta alcanzar un mínimo. Los píxeles que cumplen estas propiedades se han denominado segmentos en una dimensión (1D), bien sean negativos o positivos. En la Figura 6 se presenta gráficamente un esquema indicando los píxeles que serían englobados en un segmento positivo 1D. En una misma línea pueden identificarse varios segmentos.

No todos los segmentos así identificados son seleccionados para su tratamiento posterior, ya que se han impuesto una serie de restricciones para evitar un número elevado de falsas alarmas. Aquellos segmentos cuyo tamaño no esté comprendido entre 2 y 10 píxeles, o lo que es equivalente, 2 y 10 Km y aquellos cuyo valor medio de la velocidad radial presenta valores inferiores en valor absoluto a 12 m/s son eliminados. En la primera de las condiciones el umbral atiende al tamaño medio aproximado de los mesociclones que, como es conocido, suelen presentar un diámetro de 3 a 10 Km. En la segunda el valor de 12 m/s es un valor empírico que supone un compromiso entre el número de falsas alarmas y detecciones, en los ejemplos de los que se dispone. En futuros desarrollos y mejoras de este algoritmo habrá que analizar esta condición y redefinir este último umbral o incluso eliminarlo si es sustituido por un análisis morfológico de las distintas estructuras. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de los segmentos obtenidos al realizar un análisis por líneas.

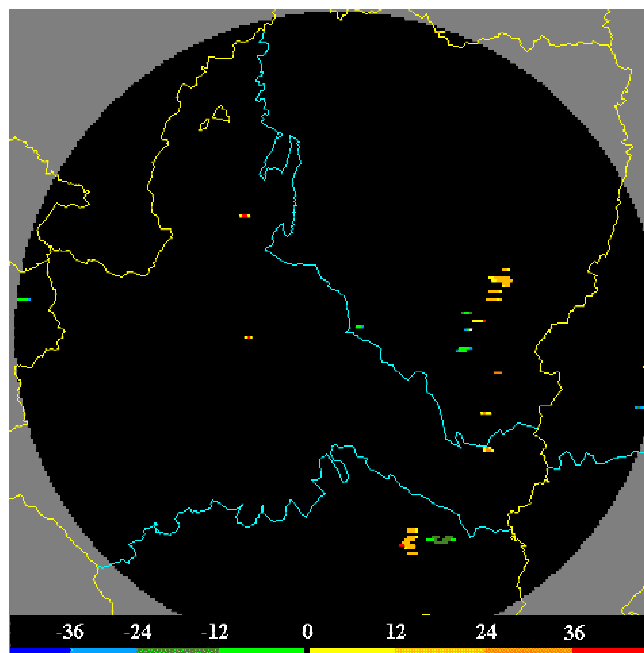


Figura 7. Segmentos identificados, positivos (colores cálidos) y negativos (colores fríos), por el algoritmo en una dimensión (1D) por líneas aplicado a los datos de la Figura 5.

c) *Análisis en dos dimensiones (2D) de líneas, agrupación de segmentos.*

Una vez identificados los segmentos en una dimensión (1D) se buscan estructuras en dos dimensiones, de tal forma que exista continuidad de los segmentos con características similares, es decir, que exista por lo menos otro segmento en una línea

adyacente que haya sido clasificado como segmento 1D. El resultado de este análisis se muestra en la Figura 8.

d) Análisis 1D por columnas.

Una vez analizada la imagen por líneas según las ideas anteriores se procede a realizar un proceso similar, pero llevando a cabo el análisis por columnas, en primer lugar se localizan segmentos (1D) en dirección norte-sur.

e) Análisis en dos dimensiones (2D) de columnas, agrupación de segmentos.

Una vez localizados los segmentos por columnas, se identifican las correspondientes estructuras en dos dimensiones (2D), buscando que exista continuidad con los de las columnas adyacentes. En las Figuras 9 y 10 se presentan, respectivamente, los resultados de identificación de segmentos en dirección norte-sur y de las estructuras 2D correspondientes.

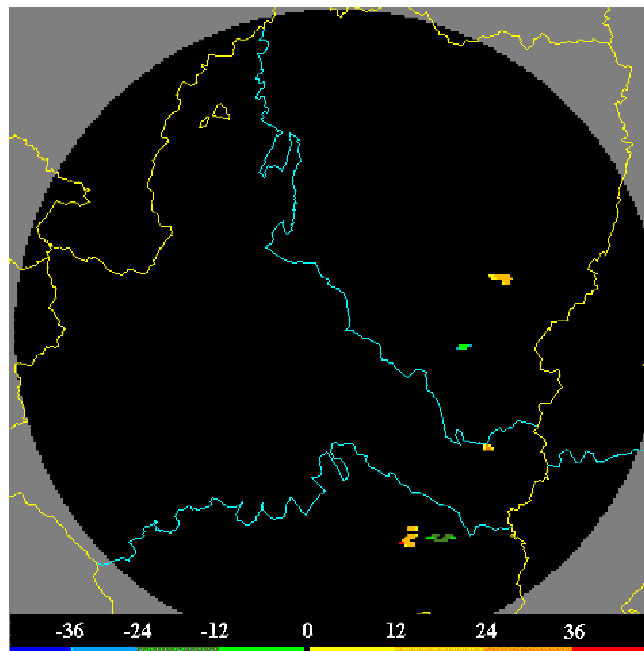


Figura 8. Estructuras 2D después de realizar el análisis por líneas.

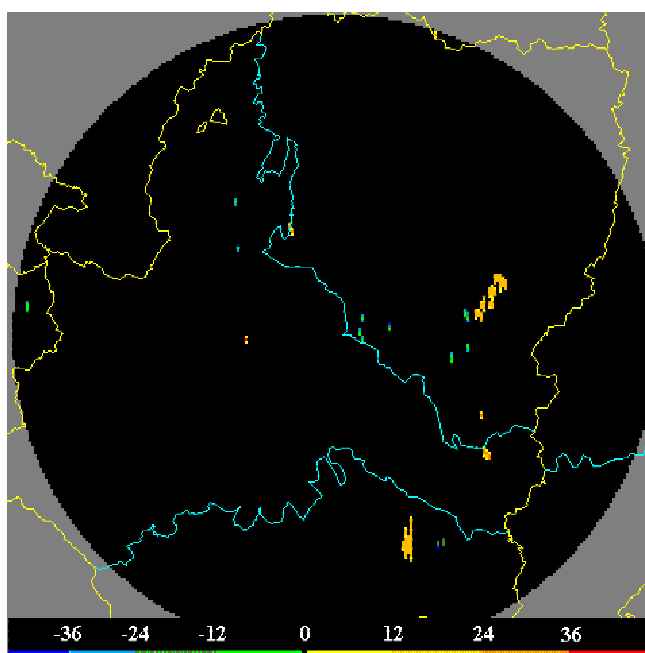


Figura 9. Segmentos identificados por el algoritmo (1D) por columnas aplicado a los datos de la Figura 5.

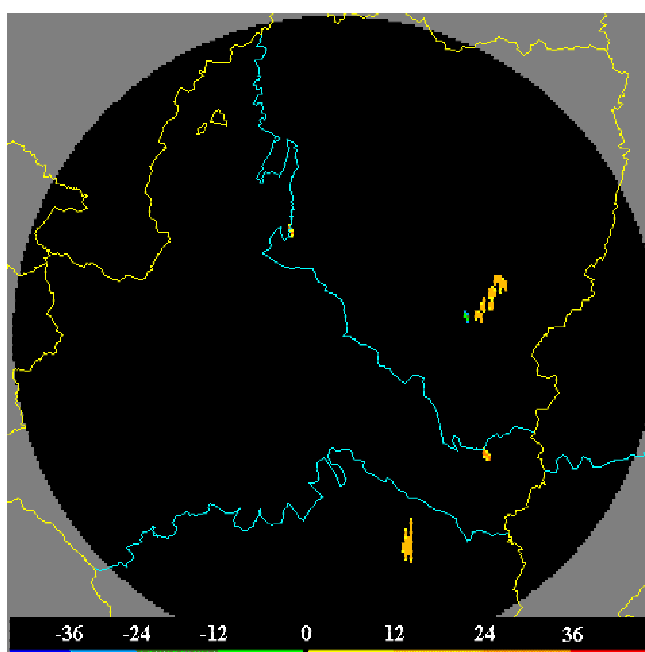


Figura 10. Estructuras 2D después de realizado el análisis por columnas.

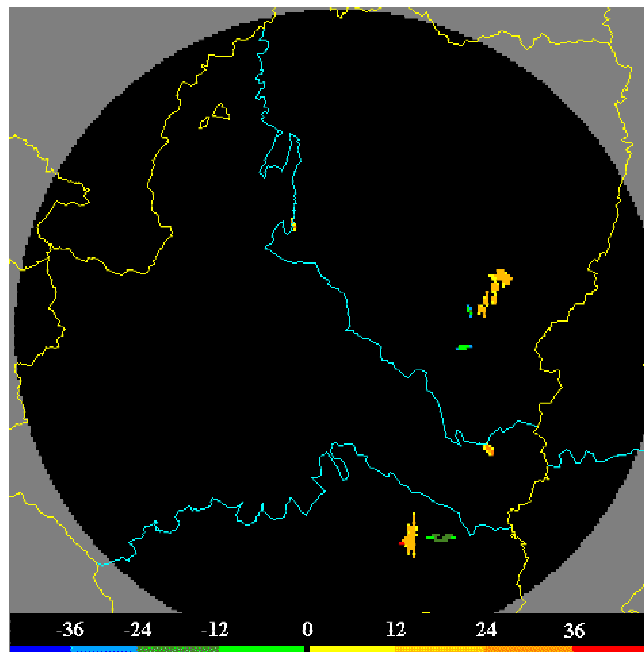


Figura 11. Combinación de las estructuras 2D una vez realizados los análisis por filas y por columnas.

f) Localización de máximos y mínimos.

Una vez localizadas las estructuras en ambas direcciones se combinan todos los píxeles, como se muestra en la Figura 11, que es la unión de las Figuras 8 y 10. Se buscan a continuación máximos y mínimos dentro de las estructuras positivas y negativas. En primer lugar se busca un máximo positivo y una vez identificado se busca un mínimo a una distancia no superior a 20 Km. Este valor es superior al tamaño medio, ya comentado anteriormente, del diámetro de los mesociclones, sin embargo en esta primera fase se ha preferido intentar detectar el mayor número de estructuras significativas posibles, aunque ello suponga un aumento del número de falsas alarmas. Este valor habrá que redefinirlo según se disponga de más ejemplos con los que poder evaluar el procedimiento. Otra condición que se impone para considerar máximos y mínimos significativos es que la diferencia del valor de la velocidad entre ambos sea igual o superior a 40 m/s.

Una vez localizadas las posibles estructuras significativas dentro de la imagen de viento radial se procede a asociar estas estructuras con datos de reflectividad en un entorno próximo. Si alrededor del punto medio de unión del máximo y el mínimo y en un radio de 25 Km. existen por lo menos cuatro píxeles con valores de reflectividad mayores o iguales de 20 dBZ la estructura señalada se considera significativa. Si esta condición no se cumple se desecha. En la presentación experimental, las estructuras identificadas se señalan con un círculo en la imagen original de viento radial Doppler, tal y como puede verse en la Figura 12. El radio del círculo no tiene relación con la intensidad o tamaño de la estructura identificada.

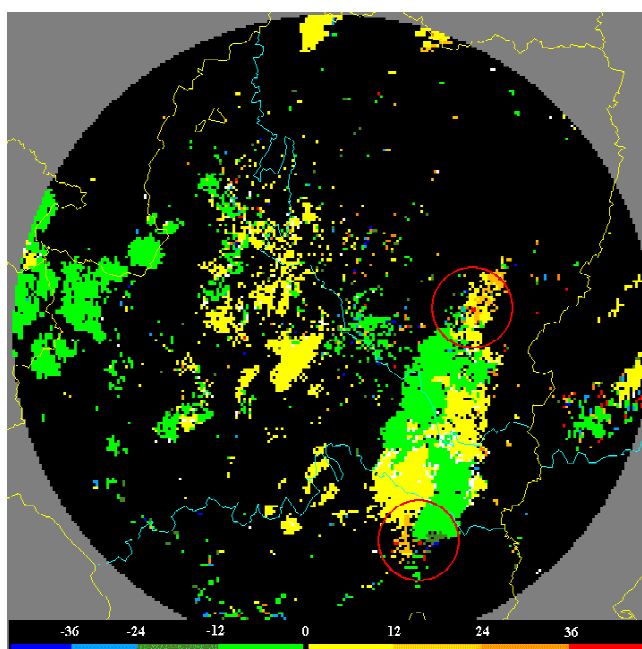


Figura 12. Imagen original del radar de Zaragoza, 14:54 UTC del 23/07/03 donde se encuentran señaladas las estructuras significativas identificadas de forma automática por el procedimiento con círculos rojos. La estructura que corresponde a la provincia de Teruel, concretamente sobre Alcañiz, estaría asociada con el mesociclón de la supercélula que afectó a la citada localidad, donde se registró un tornado, aproximadamente a las 15:00 UTC.

5. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO A ESTRUCTURAS SIMULADAS

El algoritmo desarrollado no se limita a la detección de mesociclones, sino que es capaz de identificar otras estructuras significativas dentro del campo de viento radial. En esta sección se muestran algunos ejemplos teóricos e idealizados de distintas estructuras significativas que podrían encontrarse en las imágenes de viento radial Doppler y su detección por parte del procedimiento descrito anteriormente. Se han utilizado distintos tipos de situaciones:

- Divergencia, Figura 13.
- Convergencia, Figura 14.
- Giro ciclónico, Figura 15.
- Giro anticiclónico, Figura 16
- Combinación de distintos movimientos, Figuras 17, 18, 19 y 20.

Para facilitar la interpretación de imágenes de viento radial Doppler recordemos que los colores azules y verdes se corresponden con vientos que se aproximan a la posición del radar y que los colores amarillos y rojos corresponden a vientos que se alejan de la citada posición.

Aunque las imágenes simuladas se corresponden con diferentes situaciones que podrían encontrarse en imágenes reales, difícilmente la interpretación sería tan fácil y directa, por lo que la localización automática de estructuras significativas en las imágenes de viento radial Doppler constituyen una ayuda inestimable para el predictor.

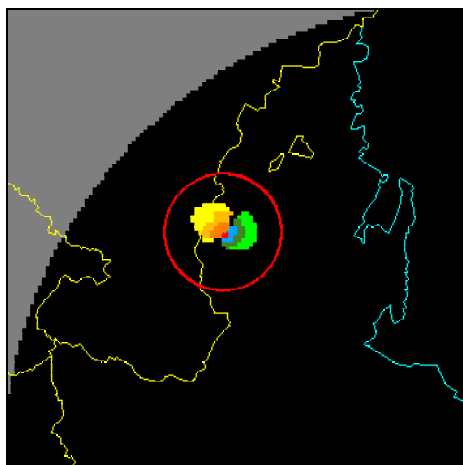


Figura 13. Estructura teórica de divergencia pura en el campo de viento radial. El radar se encuentra situado al SE de la imagen, en el centro de la cobertura del radar.

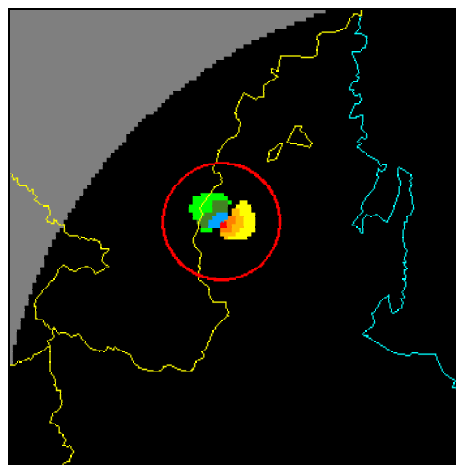


Figura 14. Ídem que 13 pero para convergencia pura.

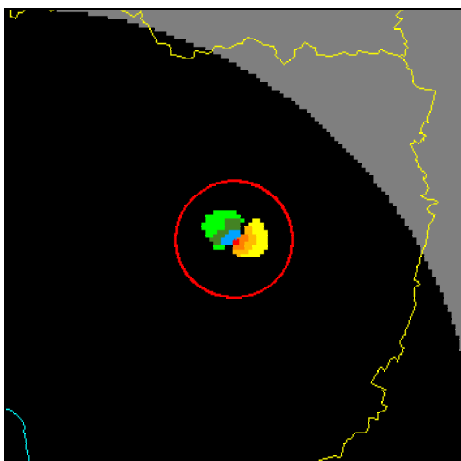


Figura 15. Ídem que 13 pero para un giro ciclónico. El radar se encuentra situado al SW de la imagen, en el centro de la cobertura del radar.

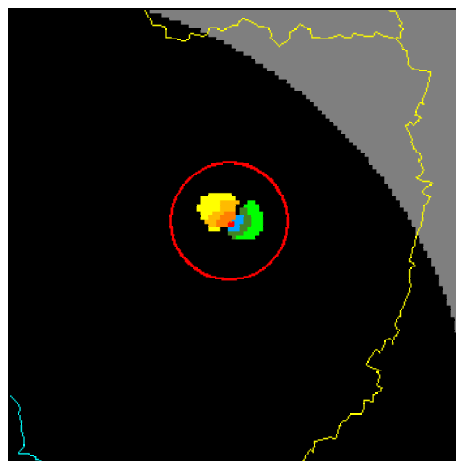


Figura 16. Ídem que 15 pero para un giro anticiclónico en el campo de viento.

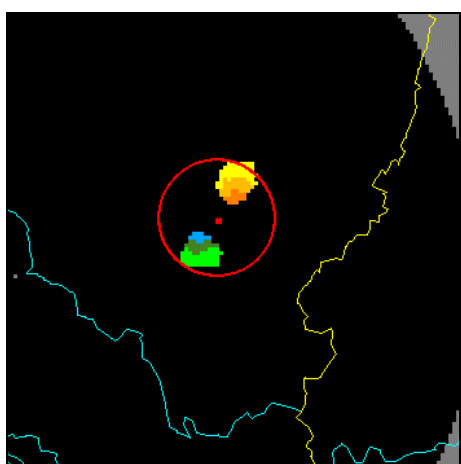


Figura 17. Ídem que 13 pero para una posible translación con divergencia. El radar se encuentra situado al WSW de la imagen, en el centro de la cobertura del radar.

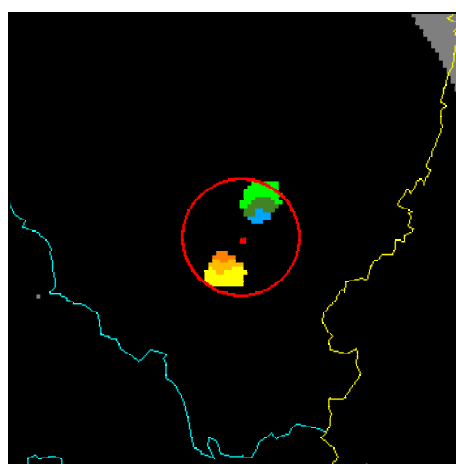


Figura 18. Ídem que 17 pero para una posible translación con convergencia.

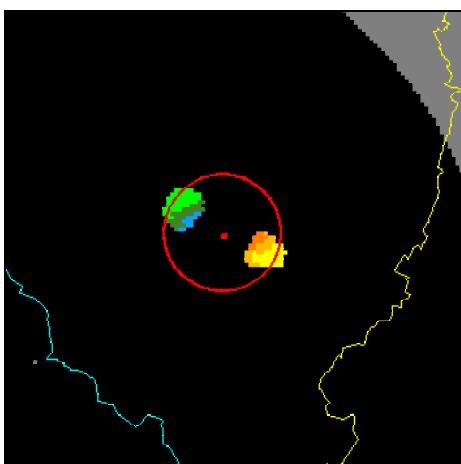


Figura 19. Ídem que 17 pero para un posible giro ciclónico divergente.

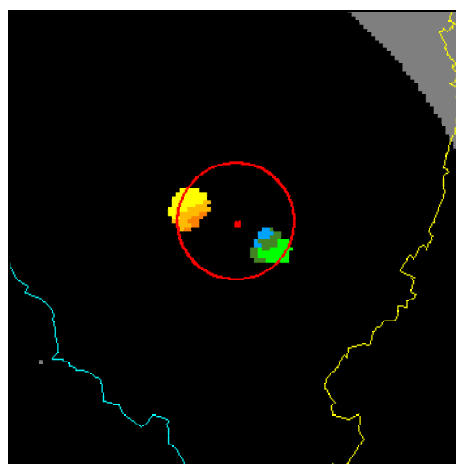


Figura 20. Ídem que 17 pero para un posible giro anticiclónico divergente.

Por supuesto existen estructuras significativas que el algoritmo, en su estado actual, no es capaz de identificar, como aquellas en las que no existe un máximo y un mínimo cuya diferencia de valor supere los 40 m/s (umbral elegido experimentalmente utilizando el análisis de los ejemplos de mesociclones disponibles en este momento para llegar a un compromiso entre detecciones y falsas alarmas). Esto puede ser debido a que tanto el mínimo como el máximo, o sólo uno de ellos, presenten vientos débiles que no cumplen las restricciones impuestas por el algoritmo, lo que puede ocurrir en situaciones en las cuales las estructuras significativas de viento se trasladan con rapidez. Las Figuras 21 y 22 son algunos ejemplos que podrían corresponderse con estas situaciones. Con vistas al futuro, sería necesario incluir modificaciones para que este tipo de estructuras sean correctamente identificadas, lo que obligará a tener en cuenta la traslación de las estructuras.

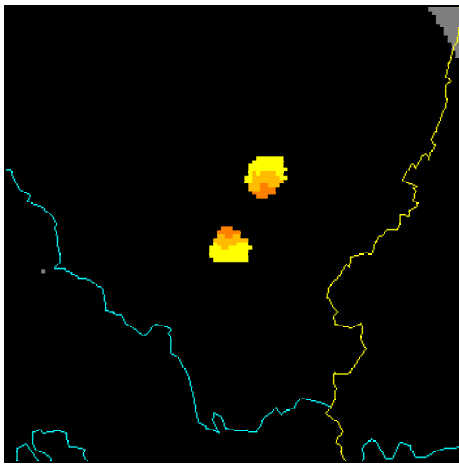


Figura 21. Ejemplo teórico de estructura no identificada actualmente por el algoritmo, vientos del mismo sentido. El radar se encuentra situado al WSW de la imagen.

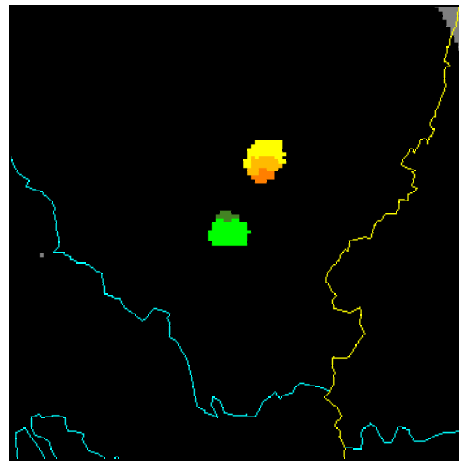


Figura 22. Ejemplo teórico de estructura no identificada actualmente por el algoritmo. Vientos aproximándose al radar demasiado débiles. El radar se encuentra situado al WSW de la imagen.

6. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO A SITUACIONES REALES

En esta sección se van a presentar algunas situaciones reales ocurridas a lo largo del año 2003, para las que existe conocimiento del desarrollo de supercélulas o de algún fenómeno significativo de viento.

a) Radar de Zaragoza. 27 de julio de 2003 entre las 14:54 UTC y las 15:14 UTC.

Un análisis subjetivo del viento radial Doppler, junto con el resto de información radar, confirma la existencia de una supercélula al norte de Teruel; además, también existen en este caso evidencias directas de un tornado que afectó a la localidad de Alcañiz (Teruel). La imagen de las 14:54 UTC ya se ha usado en el apartado 4 para ilustrar los diferentes pasos del procedimiento. El algoritmo desarrollado es capaz de identificar desde las 14:54 UTC la presencia de una estructura significativa en la imagen de viento radial sobre la zona de Alcañiz, que mantiene su continuidad y evolución temporal desplazándose hacia el este desde la hora señalada hasta las 15:14 UTC. El tornado que afectó a la citada población tuvo lugar alrededor de las 15:00 UTC. A las 14:54 el algoritmo detecta una segunda estructura significativa al sur de Huesca, pero no existe continuidad de la misma en las imágenes siguientes. Tampoco se tienen noticias de fenómenos significativos en la zona. En las Figuras 23, 24 y 25 se muestra la evolución temporal de las imágenes de viento radial Doppler, en las que aparecen señaladas con un círculo rojo las estructuras significativas detectadas de forma automática.

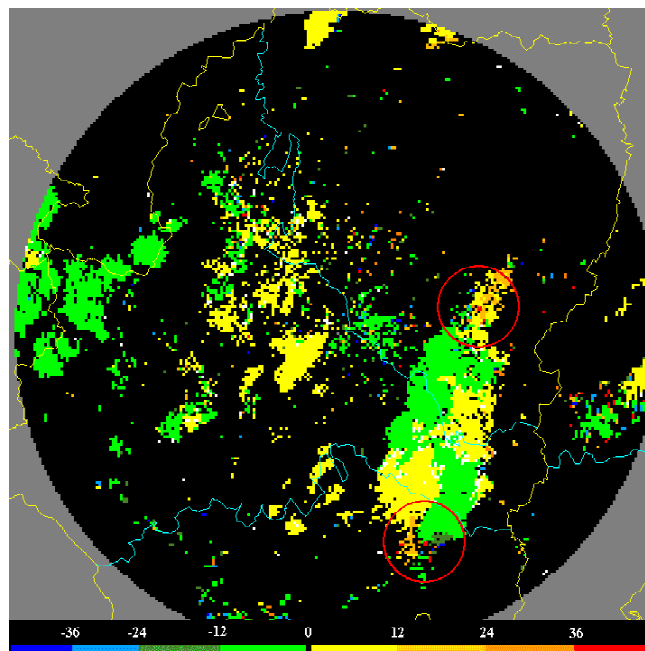


Figura 23. Radar de Zaragoza. Imagen analizada automáticamente del viento radial del 23/07/03 a las 14:54 UTC. Las estructuras significativas de viento aparecen señaladas con un círculo rojo

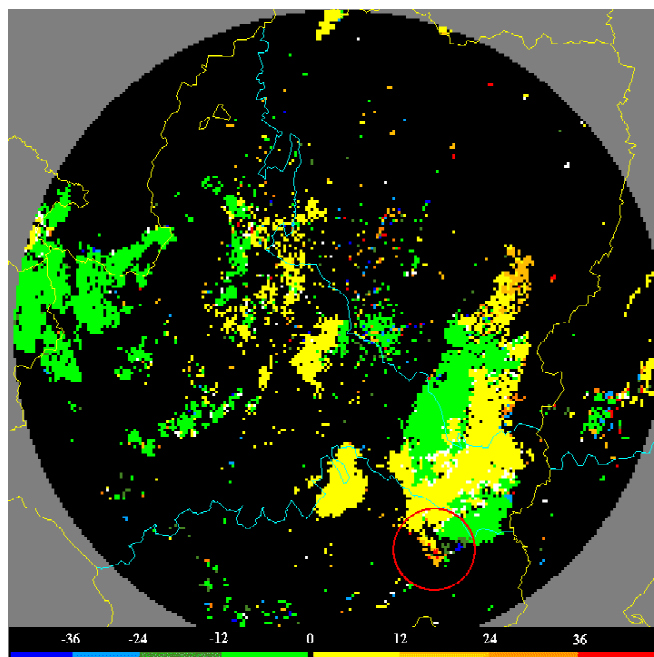


Figura 24. Ídem que la Figura 23 pero para las 15:04 UTC.

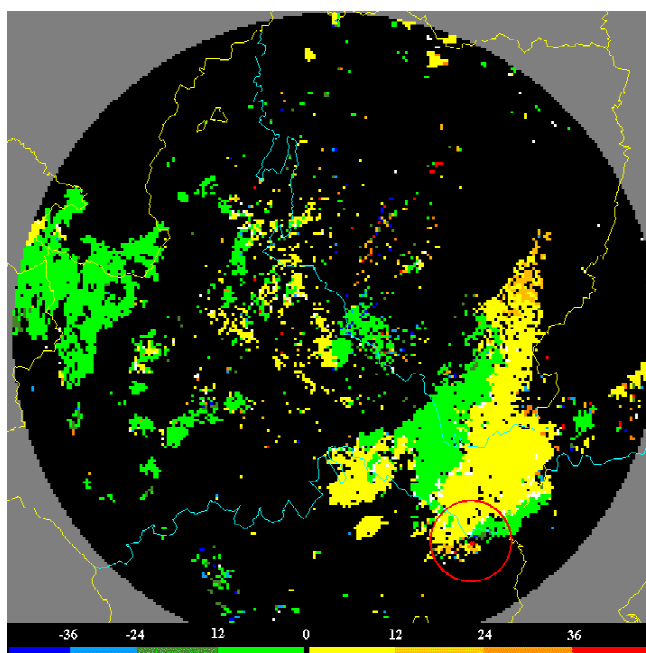


Figura 25. Ídem que la figura 23 pero para las 15:14 UTC.

b) Radar de Zaragoza. 16 de agosto de 2003 entre las 16:04 UTC y las 16:54 UTC.

El 16 de agosto de 2003, entre las 16:00 UTC y las 17:00 UTC existe evidencia de convección profunda y de granizo severo en el norte de Teruel, en las proximidades de Alcañiz. El algoritmo de detección de señales significativas en las imágenes de viento

radial Doppler se ha aplicado a las seis imágenes que comprenden el periodo desde las 16:04 UTC hasta la 16:54 UTC, y los resultados se presentan en las Figuras 26, 27, 28, 29, 30 y 31, intervalo en el que se desarrolló la convección y se detectó el granizo severo. A las 16:04 UTC el algoritmo identifica una estructura significativa aproximadamente sobre la zona de Alcañiz que no muestra continuidad temporal. Sin embargo, a las 16:14 UTC se identifica una estructura significativa en el campo de viento en el norte de Teruel que sí se mantiene en el tiempo, con un desplazamiento hacia el este, hasta las 16:54 UTC. En la última imagen aparecen otras señales en el NW de Zaragoza que hasta ese momento no habían sido identificadas y que parecen ser falsas alarmas como resultado de los actuales umbrales y criterios adoptados por el procedimiento, que en un futuro habrá que ajustar.

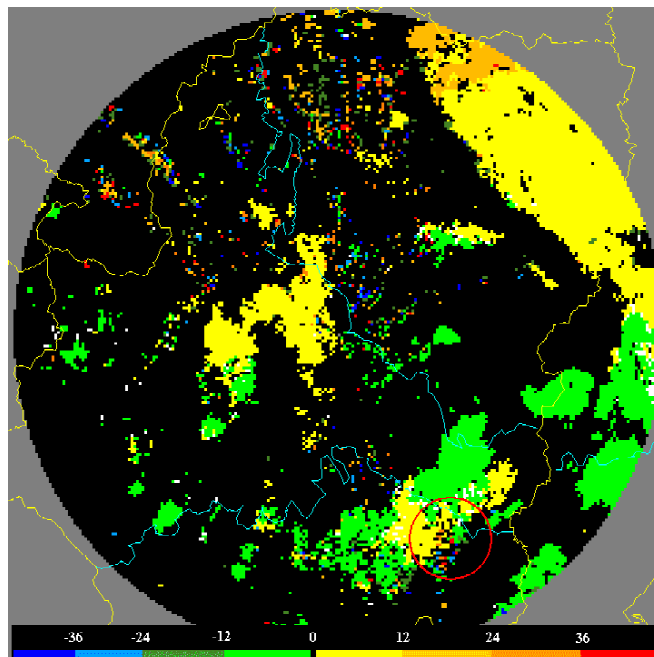


Figura 26. Radar de Zaragoza. Imagen analizada automáticamente del viento radial del 16/08/03 a las 16:04 UTC.

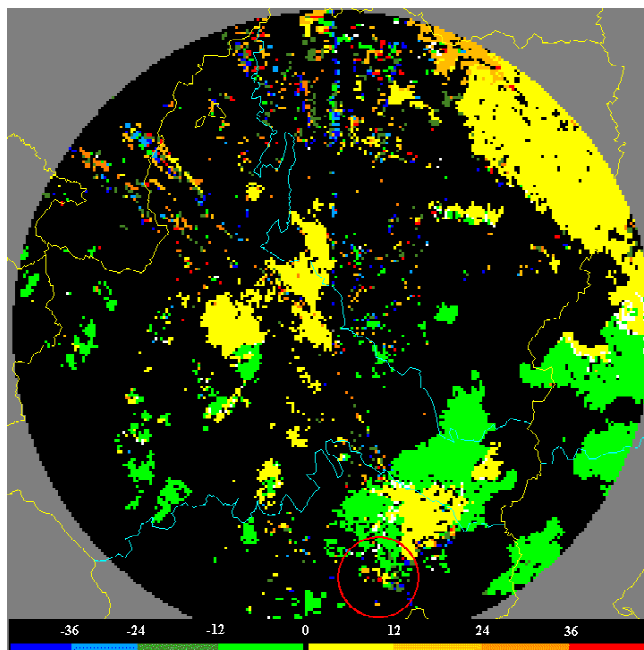


Figura 27. Ídem que la Figura 26 pero para las 16:14 UTC.

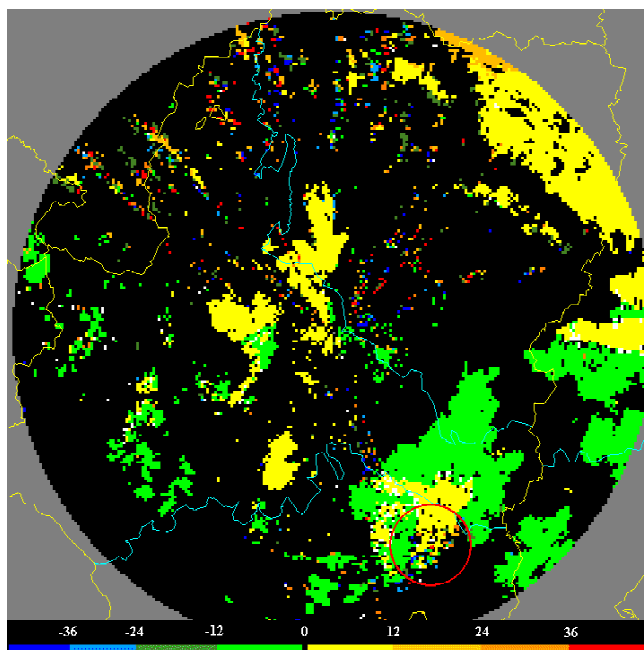


Figura 28. Ídem que la Figura 26 pero para las 16:24 UTC.

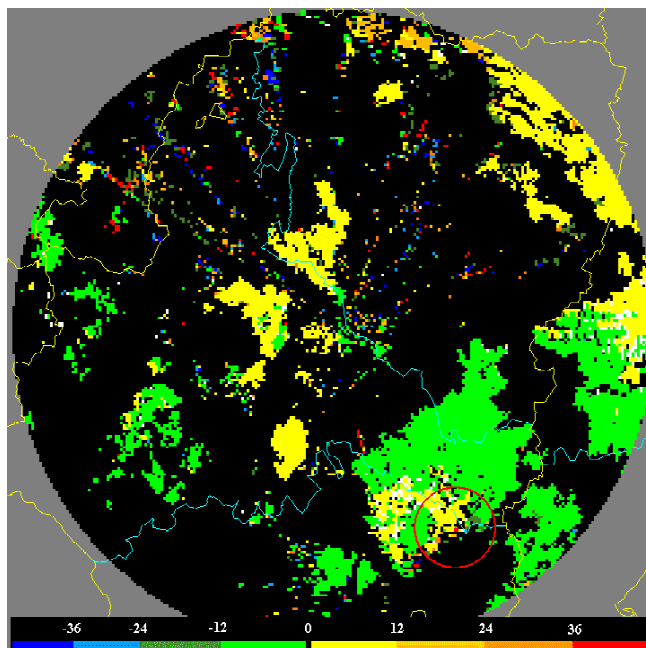


Figura 29. Ídem que la Figura 26 pero para las 16:34 UTC.

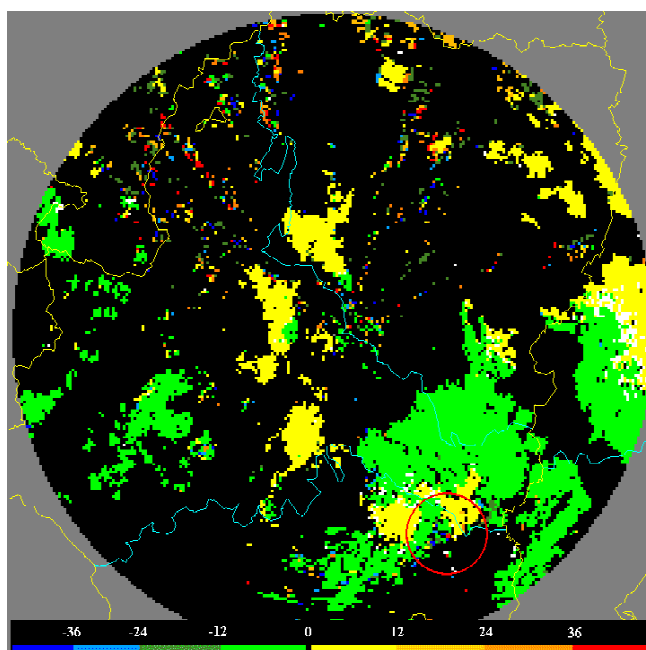


Figura 30. Ídem que la Figura 26 pero para las 16:44 UTC.

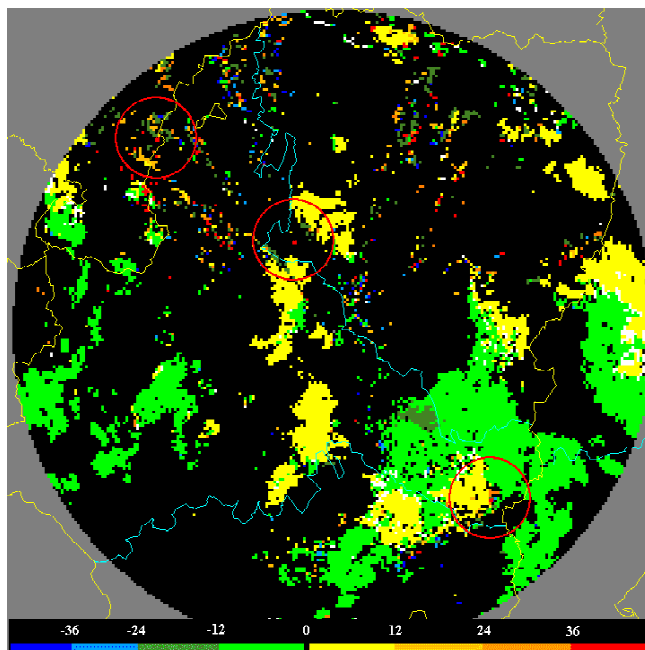


Figura 31. Ídem que la Figura 26 pero para las 16:54 UTC.

7. CONCLUSIONES

El radar es una herramienta fundamental en las actividades de vigilancia y “nowcasting”. Aunque el predictor puede interpretar directamente las imágenes radar, la automatización de ciertos procesos facilita su trabajo, o le puede ayudar a determinar la posible adversidad de una estructura tormentosa y a la hora de tomar decisiones. Para ello se ha desarrollado a lo largo del último año un procedimiento de identificación automática de mesovórtices y circulaciones significativas a escala de tormentas (1 a 10 Km. de diámetro) en niveles bajos a partir de las imágenes de viento radial Doppler.

Actualmente existe en operación en Estados Unidos un algoritmo que analiza, diagnostica y lleva a cabo un seguimiento y extrapolación de mesociclones, el NSSL MDA, el cual detecta y permite diagnosticar señales significativas en la velocidad radial a escala de tormenta. El procedimiento desarrollado en el INM se basa en este algoritmo, aunque como consecuencia de diversas limitaciones técnicas no se ha podido desarrollar un procedimiento equivalente. Esto es debido principalmente a que la información a la que se puede acceder en McIDAS está sólo disponible en coordenadas cartesianas y además de forma operativa sólo se dispone actualmente de datos de la elevación más baja, PPI a 0.5°.

Básicamente el procedimiento de detección de estructuras de viento significativas en una imagen de viento radial Doppler consiste en encontrar estructuras que cumplan una serie de características de intensidad y de tamaño, que exista una diferencia importante de velocidad entre las señales que se alejan y acercan a la posición del radar y que la distancia entre las estructuras identificadas de distinto signo no supere un valor umbral. Una vez identificadas estas posibles estructuras significativas se analiza si en la imagen de reflectividad correspondiente existen en un entorno cercano valores superiores a 20 dBZ y, si es así, se señala la estructura con un círculo rojo en la imagen original.

Este procedimiento se ha ajustado con distintas situaciones recogidas a lo largo del último año en las que se tiene conocimiento de la existencia de supercélulas o de algún fenómeno significativo de viento. Actualmente existen algunos problemas de no detección por el algoritmo, principalmente en situaciones en las que los vientos que se aproximan o se alejan de la posición del radar, o los dos, son vientos débiles que no superan el umbral experimental elegido de 12 m/s. El procedimiento actual no es capaz de detectar tampoco aquellas estructuras en las que tanto el mínimo como el máximo de viento son del mismo sentido.

La asociación con los datos de reflectividad se pretende que en un futuro esté relacionada con la aplicación operativa YRADAR, que realiza un análisis objetivo automático de las imágenes radar de reflectividad en modo normal y permite extraer información de estructuras (2D) y células (3D) convectivas.

Se prevé que a lo largo del año 2004 se llevará a cabo una evaluación de este algoritmo, mediante su aplicación en situaciones reales. Una vez que se disponga de un archivo de situaciones se procederá a reajustar los distintos umbrales, si esto fuera necesario. Otra asignatura pendiente es proceder al desarrollo de módulos para realizar el seguimiento y extrapolación de las estructuras significativas de viento identificadas. Entre los proyectos del STAP se encuentra poner en operación un procedimiento de identificación

automática de mesociclones y estructuras significativas a partir de datos de radar Doppler en el 2005, que permita su caracterización una vez identificadas, es decir, que automáticamente informe al predictor si la estructura es un mesociclón, una circulación ciclónica u otro tipo de estructura, además de ofrecer información de su posición, tamaño y posible desplazamiento.

BIBLOGRAFÍA

Conejo, S., y F. Elizaga, 2003: Aplicación a la vigilancia y predicción inmediata de los perfiles de viento derivados de radares meteorológicos Doppler. Nota Técnica STAP N°40, INM.

Conejo, S., y F. Elizaga, 2004: Análisis comparativo de los perfiles de viento VAD y los vientos de radiosondeos. Nota Técnica STAP N°41, INM.

Desrochers, Paul R. and Ralph J. Donaldson, 1992: Automatic Tornado Prediction with an Improved Mesocyclone-Detection Algorithm. *Weather and Forecasting*: Vol. 7, No. 2, pp. 373–388.

Glosario meteorológico de términos radar para tormentas, National Weather Service Forecast Office, www.srh.noaa.gov/oun/severewx/glossary.php#Introduction.

Martín F., F. Elizaga, O. Carretero e I. San Ambrosio, 2001: Diagnóstico y Predicción de la Convección Profunda. Nota Técnica STAP N° 35, INM.

Martín F., O. Carretero e I. San Ambrosio, 2002: Análisis de estructuras y células convectivas mediante datos de radar regional: Aplicación YRADAR. Publicación interna del INM.

Mazur R.J., G. J. Stumpf, V. Lakshmanan, 2003: Quality control of radar to improve mesocyclone detection. Oklahoma Weather Center Research Experience for Undergraduates.

Stumpf, G. J. and A. Witt, 1994: The new NSSL mesocyclone detection algorithm functional description. Rep. for the NWS Operational Support Facility.

Stumpf, Gregory J., Arthur Witt, E. DeWayne Mitchell, Phillip L. Spencer, J. T. Johnson, Michael D. Eilts, Kevin W. Thomas, Donald W. Burgess, 1997: The National Severe Storms Laboratory Mesocyclone Detection Algorithm for the WSR-88D*. *Weather and Forecasting*: Vol. 13, No. 2, pp. 304–326.

Zrnica, D.S., D.W. Burgess, and L.D. Hennington, 1985: Automatic detection of mesocyclonic shear with Doppler radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **2**, 425-438.